

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. A. Chinnov, O. A. Kabov, O. V. Zhukovskaya, I. A. Sharina, Heat transfer in a subcooled evaporating liquid film,
TVT, 2006, Volume 44, Issue 6, 903–912

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt1475>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.84

April 26, 2025, 17:36:01



УДК 536.423.4

ТЕПЛООБМЕН В НЕДОГРЕТОЙ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

© 2006 г. Е. А. Чиннов, О. А. Кабов, О. В. Жуковская, И. А. Шарина

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 23.06.2005 г.

Выполнено исследование теплообмена в пленках воды и жидкости FC-72, стекающих по нагревателю размером 60×120 мм. Построены карты режимов теплообмена. Выделены зоны формирования структур и области возникновения разрыва пленки жидкости, а также кипения в струях. Для анализа экспериментальных данных использовался осредненный коэффициент теплоотдачи. Показано, что термокапиллярные силы оказывают сложное и неоднозначное влияние на теплообмен. Появление обширных устойчивых сухих пятен вызывает уменьшение среднего коэффициента теплоотдачи. С другой стороны, увеличение длины пробега пленки и амплитуды волнового движения приводит к смыванию сухих пятен и увеличению относительной интенсивности теплообмена. Закономерности теплообмена в области течения пленки с разрывами существенно различаются для слабо и интенсивно испаряющейся жидкости. В условиях значительного испарения при формировании структур в термокапиллярном режиме обнаружена интенсификация теплообмена.

PACS: 68.03.Fg

ВВЕДЕНИЕ

Процессы теплообмена в пленках жидкости широко используются в различных отраслях промышленности. На практике, как правило, реализуются течения пленок при достаточно больших числах Рейнольдса ($Re = 50-1000$), поскольку при меньших Re возникает опасность кризисных явлений (разрыва пленок). Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости достаточно широко освещены в ряде публикаций [1–9] и др.

Известные из литературы обобщающие зависимости и методики расчетов теплообмена в стекающей пленке применимы либо к недогретой до температуры насыщения жидкости без учета испарения [7], либо к испаряющейся жидкости при температуре насыщения [9]. Эти зависимости дают удовлетворительный результат при относительно невысоких тепловых потоках и больших числах Рейнольдса [4].

Результаты экспериментального исследования теплообмена от локального источника тепла к пленке, существенно недогретой до температуры насыщения воды и перфтортриэтиламина, представлены в [10, 11]. В [10] использовались нагреватели длиной по потоку 2.2 и 4 мм, шириной 68 мм, а в работе [11] – соответственно 6.5 и 13 мм. Проанализирована связь теплообмена и режимов течения. Выполнен анализ данных для различных жидкостей в широком диапазоне чисел Рейнольдса пленки. Показано, что при малых числах Рейнольдса на нагревателях малого размера наблю-

дается существенное отклонение экспериментально определенных коэффициентов теплоотдачи от значений, рассчитанных по зависимостям [7]. Возможной причиной расхождения является существенное влияние на структуру потока термокапиллярных сил, приводящих к формированию струйного течения.

В [12] экспериментально исследовано испарение, кипение и кризис теплообмена при температуре насыщения в пленке жидкого азота, стекающей по вертикальной поверхности с нагревателем шириной 65 и длиной 12 мм. В докризисных режимах зарегистрировано регулярное ривулетное течение жидкости.

В работах [13, 14] изучался теплообмен в недогретой до температуры насыщения пленке воды, стекающей по нагревателю размером 150×150 мм, в условиях формирования струйных течений под действием термокапиллярных сил. Измерены локальные тепловые потоки, температуры на поверхностях нагревателя и пленки жидкости, определены коэффициенты теплоотдачи как в области слабдеформированной пленки, так и при развитом струйном течении. Выполнено сравнение опытных данных с численными расчетами для плоской пленки. Показано, что в межструйной области в нижней части нагревателя при высоких плотностях теплового потока происходит увеличение локального коэффициента теплоотдачи. Однако вопрос об интенсификации теплообмена при формировании струй, а именно увеличении

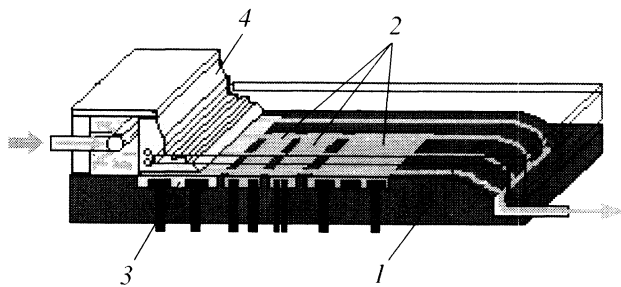


Рис. 1. Схема рабочего участка: 1 – плита из текстолита, 2 – нагреватели, 3 – стабилизатор температуры, 4 – пленкоформователь.

среднего коэффициента теплоотдачи, оставался открытым.

В работах [15, 16] показано, что помимо термокапиллярного механизма формирования струй существует термокапиллярно-волновой механизм. Установлено, что при термокапиллярно-волновом механизме вертикальные струи формируются на неоднородностях в пленке по гребням двухмерных волн при их распаде на трехмерные или на развитых синхронных трехмерных волнах. Обнаружено формирование структур двух типов А и Б, различающихся уровнем теплового потока, необходимого для их возникновения, характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса. Первые эксперименты на нагревателе размером 60×120 мм при условии $T_w = \text{const}$ опубликованы в работах [17, 18].

Цель данной работы состоит в изучении совместного влияния термокапиллярных сил, волновых эффектов и испарения на среднюю теплоотдачу к стекающей, недогретой до температуры насыщения пленке жидкости, а также в сравнении с имеющимися в литературе корреляциями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур, включающий рабочий участок, термостаты, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита 1 размерами $36 \times 196 \times 335$ мм с расположенными на ней тремя нагревателями 2, стабилизатора температуры 3 и пленкоформователя 4 (рис. 1). Течение пленок воды исследовалось на открытом рабочем участке, а жидкости FC-72 – на закрытом. Рабочая жидкость с помощью насоса подавалась в пленкоформователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Ширина и толщина сопла равнялись 146.6 мм, 0.1 мм соответственно. Пленкоформователь располагался в верхней части не-

сущей пластины (расстояние до нагревателя X_n составляло 63 мм или 396 мм в зависимости от конструкции рабочего участка). Жидкость, стекающая по пластине, накапливалась в приемнике и под действием гравитации возвращалась в систему.

Нагреватели представляли собой плоские теплообменники из меди с прямоугольными каналами внутри для движения нагретой жидкости. В данных экспериментах в качестве нагревателя использовался только один нижний элемент размером $L \times B = 60 \times 120$ мм, а два верхних теплообменника применялись как стабилизаторы для поддержания начальной температуры пленки T_0 . В нагревателе размером 60×120 мм размещались три канала сечением 6×16 мм. Средняя плотность теплового потока q на нагревателе определялась по количеству тепла, переданного от подогревающей воды. Расход воды изменялся от 10 до 50 г/с и измерялся ротаметром с индивидуальной калибровкой. Температура воды на входе и выходе из нагревателя фиксировалась двумя термопарами.

Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термопарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. Расстояние термопар от верхней кромки нагревателя составляло 15, 30 и 45 мм соответственно. Плотность теплового потока к пленке варьировалась в диапазоне от 2500 до 50000 Вт/м². На поверхности нагрева реализовывалось граничное условие, близкое к $T = \text{const}$. Анализ влияния граничных условий на обогреваемую стенку на теплообмен содержится в [14].

Среднемассовая температура пленки жидкости T_F измерялась с помощью термопар, расположенных в специальных “ловушках”, имеющих форму полуцилиндра диаметром 2–4 мм. Проводилась тарировка метода, при этом выдерживались условия $q = \text{const}$ на поверхности нагревателя и отсутствие испарения с поверхности пленки $q_s = 0$, а T_F определялась расчетным путем [7]. Устанавливались две ловушки с расстоянием между ними, равном половине расстояния между струями, и T_F определялась как среднееарифметическое значение. Для пленок FC-72 (расстояние между струями составляло 3–7 мм) использовалась ловушка с шириной захвата жидкости 6–14 мм. В отдельных экспериментах вся пленка жидкости за нагревателем собиралась в трапециевидный щелевой канал. Погрешность измерений перепада температуры $(T_F - T_0)$ вдоль пленки на длине нагревателя не превышала 10%.

Средний поток теплоты, расходуемый на испарение пленки, определялся как по среднемассовой температуре пленки в нижней точке нагревателя, так и по теплоте, переданной конденсатору. Для устранения испарения с поверхности жидкости после нагревателя пленка собиралась в трапециевидный щелевой канал (экран). Конденсатор

устанавливался над экраном в парогазовом пространстве ниже нагревателя. Сравнение данных, полученных на тщательно теплоизолированном рабочем участке при $X_n = 63$ мм, показало, что баланс теплоты выполняется с погрешностью менее 15%. Ошибка измерения плотности теплового потока не превышала 10%. Исследование выполнено в диапазоне чисел Рейнольдса от 4.5 до 50. Некоторая дополнительная информация о конструкции рабочего участка, методике измерений, а также фотография рабочего участка приведены в работе [17].

РЕЖИМЫ ТЕПЛООБМЕНА

Зависимость теплового потока от разности средней температуры нагревателя и начальной температуры пленки воды при $X_n = 63$ мм показана на рис. 2 для $Re = 1$ и $Re = 4$ ($Re = \Gamma/\mu$, Γ – удельный массовый расход жидкости, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости). На рис. 2 выделен режим 1 (сплошная линия), соответствующий течению сплошной пленки жидкости. Появление структур типа А [15, 16] (рис. 3а) приводило к незначительному изменению интенсивности теплообмена. Перед разрывом пленки при $Re = 4$ наблюдалось отклонение экспериментальных данных от линейной зависимости $q(\Delta T_0)$, где $\Delta T_0 = T_w - T_0$. Средняя температура поверхности нагревателя T_w определялась как среднее значение измеренных температур в трех точках. При возникновении первых сухих пятен на поверхности нагревателя (рис. 3б) начинала происходить смена режимов теплообмена. При увеличении размеров сухих пятен и их распространении в межструйной области вниз по течению наблюдался рост плотности среднего теплового потока при практически постоянном значении перепада температур, что, по-видимому, связано с интенсивным испарением в менисках. В струйной области течения жидкости (режим 2), когда движение струй осуществлялось по осушенной поверхности (рис. 3в), показатель степени в зависимости $q = \Delta T_0^n$ уменьшался до $n = 0.63$.

Аналогичная смена режимов теплообмена при $X_n = 63$ мм для $Re = 22$ показана на рис. 4. Смена режимов теплообмена начиналась при появлении сухих пятен. После разрыва пленки и перехода к струйному течению увеличение перепада температур также приводило к росту теплового потока. Однако при $Re = 22$ показатель степени (в режиме 2) уменьшался до $n = 0.43$. Этот факт объясняется разными механизмами формирования струй и разрыва пленки. При $Re = 1-4$ струи формировались в режиме А (минимальная длина волны неустойчивости). Межструйные области и соответственно сухие пятна имели наименьшую ширину. Развитие сухих пятен происходило отно-

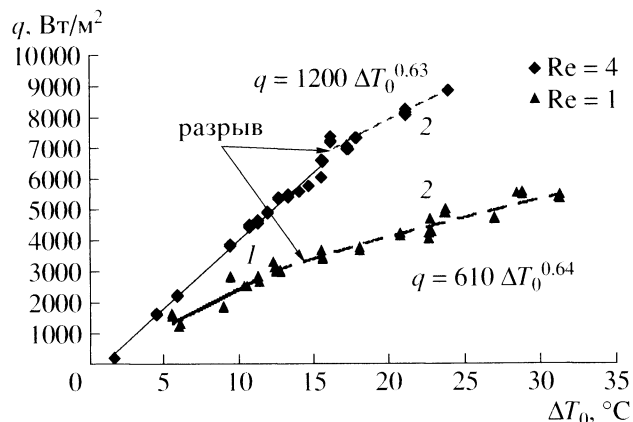


Рис. 2. Режимы теплообмена, вода, $X_n = 63$ мм. 1 – режим 1, 2 – режим 2.

сительно медленно. Струи стекали по нагревателю регулярно (см. рис. 3в). Достигалась относительно высокая интенсивность теплообмена. Другая картина наблюдалась при $Re = 22$. Перед разрывом пленки на ее поверхности одновременно развивались разные типы неустойчивости (в верхней части нагревателя реализовывался режим А, а в нижней части нагревателя – режим Б) (рис. 5а). В результате после разрыва пленки нарушалась регулярность формирования струй (рис. 5б), площадь смачиваемой поверхности существенно уменьшалась, что приводило к снижению интенсивности теплообмена.

Влияние X_n на режимы теплообмена также показано на рис. 4. Разрыв пленки при $X_n = 396$ мм наступал примерно при тех же тепловых потоках, что и при $X_n = 63$ мм, но движение пленки в виде крупных волн (солитонов) препятствовало устойчивому формированию струй. Происходило динамическое разрушение солитонов на структуры типа Б. В центре нагревателя межструйные области постоянно орошались натекающей волновой пленкой (рис. 5в). Тепловой поток монотонно возрастал с увеличением разности температур. В результате трехмерного волнового течения пленки и динамического взаимодействия с термокапиллярными силами интенсивность теплоотдачи возрастала ($n = 0.78$).

При течении пленки FC-72 переход между режимами теплообмена становился менее выраженным. Для минимальной начальной температуры $T_0 = 17-18^\circ\text{C}$ можно выделить излом на кривой $q(\Delta T_0)$ в области появления сухих пятен (рис. 6). Для $Re = 4.4$ струи формировались при $\Delta T_0 = 10-13^\circ\text{C}$. При $q \geq 3000$ Вт/м² наступал режим 2, когда все струи были отделены друг от друга сухими полосами, показатель степени в зависимости $q = \Delta T_0^n$ составлял $n = 1.1$. В диапазоне $q = 3000-3500$ Вт/м² течение струй было прямолинейно, устойчиво, с

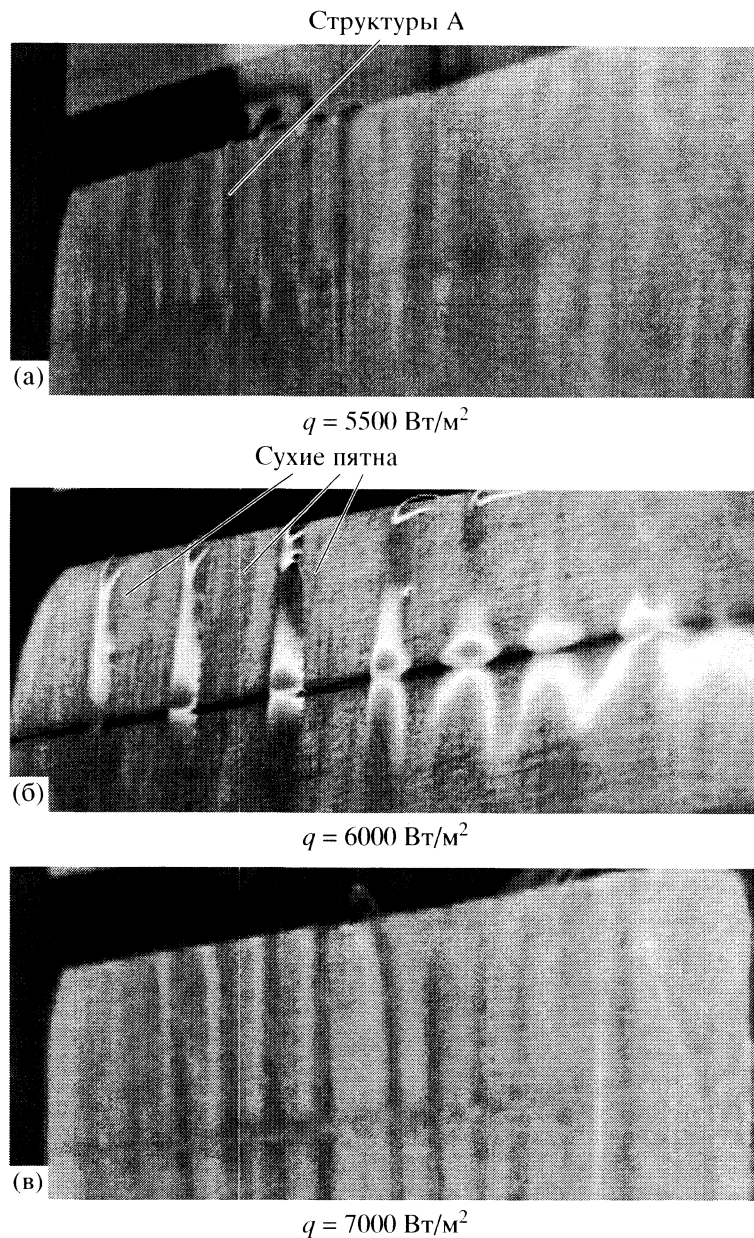


Рис. 3. Фотографии течения пленок воды, $Re = 4$, $X_n = 63$ мм. (а) – $q = 5500 \text{ Вт/м}^2$, (б) – 6000 , (в) – 7000 .

одинаковым расстоянием между струями. С увеличением плотности теплового потока происходила потеря устойчивости течения струй, их движение становилось зигзагообразным. При $q = 7800 \text{ Вт/м}^2$ неустойчивость струй приводила к их распаду на капли в нижней части нагревателя и ухудшению теплоотдачи.

При $T_0 = 23^\circ\text{C}$ и $Re = 4.8$ структуры формировались при больших значениях q . В режиме теплообмена 2 наблюдалось зигзагообразное движение струй и $n = 1.14$. Ухудшение теплоотдачи происходило при $\Delta T_0 \geq 33^\circ\text{C}$ за счет испарения струй в нижней части нагревателя. При дальнейшем увеличении перепада температур имел место

рост плотности теплового потока (режим 3) с примерно тем же показателем степени $n = 1.15$. Происходила конкуренция двух механизмов теплоотдачи: кипения в струях в верхней части нагревателя и полного испарения струй в нижней части. При увеличении начальной температуры, а следовательно, интенсивности испарения тепловой поток, соответствующий одинаковой разности температур, возрастал, граница между режимами теплообмена исчезала. Увеличение Re и, соответственно, амплитуды волнового движения также приводило к вырождению границы между режимами при всех исследуемых начальных температурах.

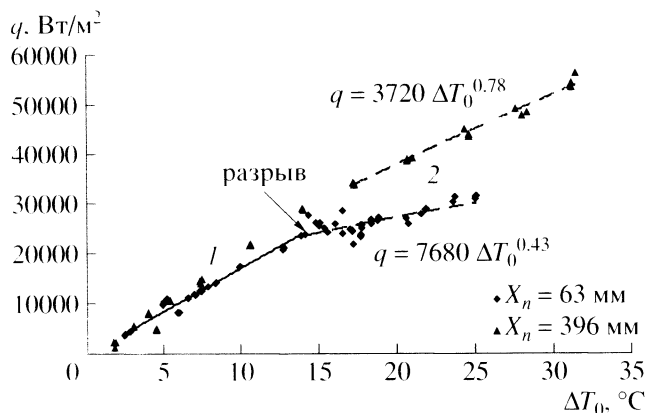


Рис. 4. Влияние длины пробега пленки на режимы теплообмена при $Re = 22$, вода. 1 – режим 1, 2 – режим 2.

ОСРЕДНЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от теплового потока для пленок воды при $X_n = 63$ мм показана на рис. 7 для чисел Рейнольдса от 2 до 22. Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывался по зависимости $\alpha_{av} = q/(T_w - T_0)$. На нагревателе выполнялось условие, близкое к $T_w = \text{const}$. До появления структур на поверхности пленки средний коэффициент теплоотдачи практически не зависел от теплового потока. В области формирования струй и разрыва пленки наблюдался значительный разброс данных, что связано с многократным повторением измерений и неоднозначностью перехода к струйному режиму. Количество струй и характер их течения по нагревателю могли несколько отличаться при повторных измерениях. После формирования струйного режима при $X_n = 63$ мм (струи стекали по осушенной поверхности) коэффициент теплоотдачи снижался на 10–30%.

Для $Re = 4$ при появлении структур типа А коэффициент теплоотдачи снижался на 10%. Уменьшение интенсивности теплообмена началось при $q = 5500$ Вт/м², когда на поверхности пленки неоднородности толщины становились существенными и происходило формирование структур (рис. 3а). Для $Re = 22$ появление структур типа А и Б не оказывало существенного влияния на коэффициент теплоотдачи. Значительное изменение интенсивности теплообмена происходило при разрыве пленки. При $Re = 10$ и 22 развитие структур А (рис. 5а) не происходило, как это наблюдалось на поверхности пленок при меньших Re (см. рис. 3). После появления на поверхности пленки жидкости структур типа А или Б (рис. 5а) увеличение плотности теплового потока приводило к разрыву пленки (рис. 5б). Конвективный коэффициент теплоотдачи в отсутствие испарения ($q_s/q < 0.15$, q_s – плотность теплового потока, расходуемая на

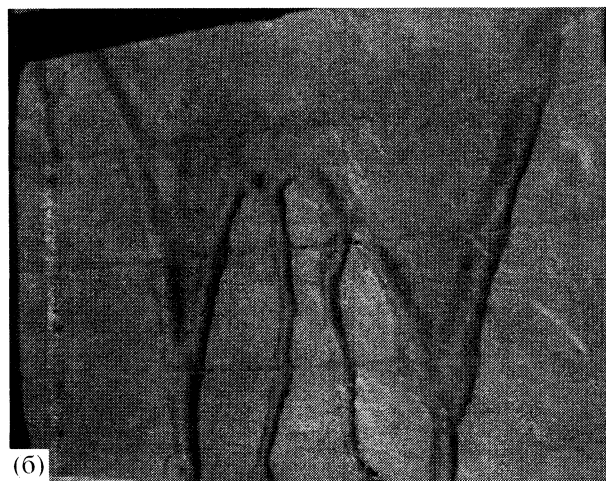
Структуры А



(а)

Структуры Б

$q = 2100$ Вт/м², $X_n = 63$ мм



(б)

$q = 26000$ Вт/м², $X_n = 63$ мм, разрыв



(в)

$q = 46000$ Вт/м², $X_n = 396$ мм

Рис. 5. Фотографии течения пленок воды при $Re = 22$. (а) – $q = 2100$ Вт/м², $X_n = 63$ мм; (б) – $q = 2600$ Вт/м², $X_n = 63$ мм, разрыв; (в) – $q = 4600$ Вт/м², $X_n = 396$ мм.

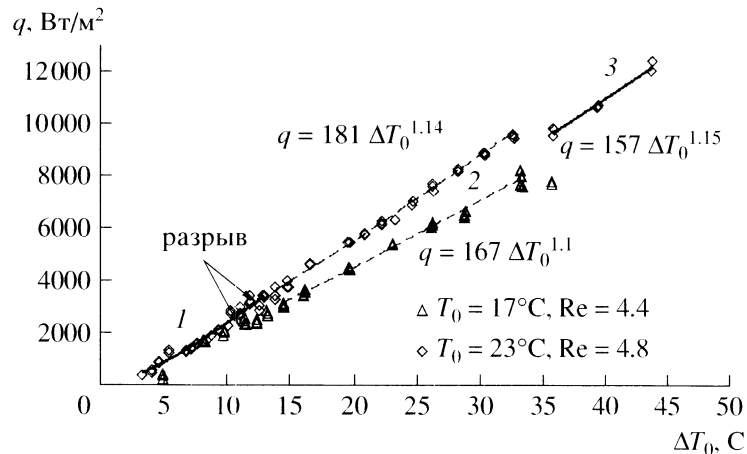


Рис. 6. Режимы теплообмена, FC-72. 1 – режим 1, 2 – 2, 3 – 3.

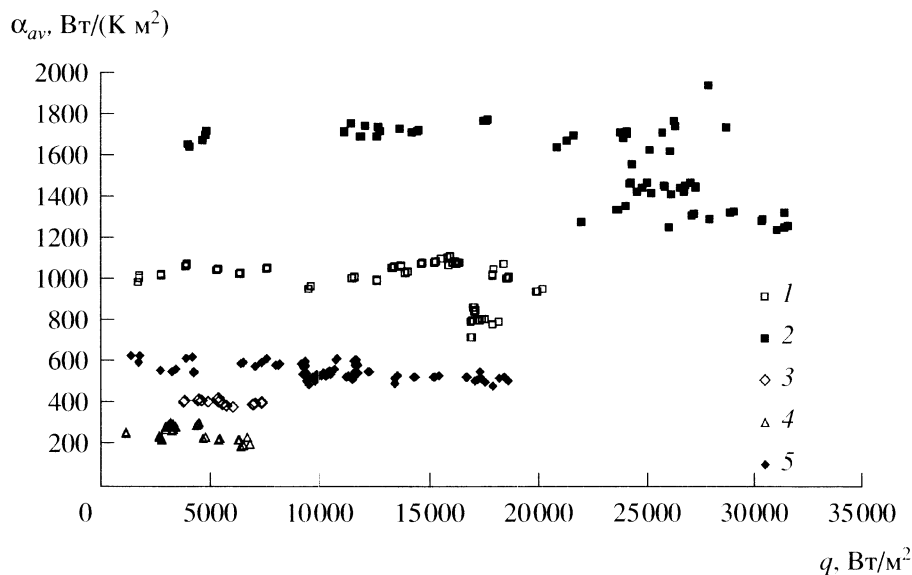


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, вода, $X_n = 63$ мм. 1 – Re = 10, 2 – 22, 3 – 4, 4 – 2, 5 – 5.

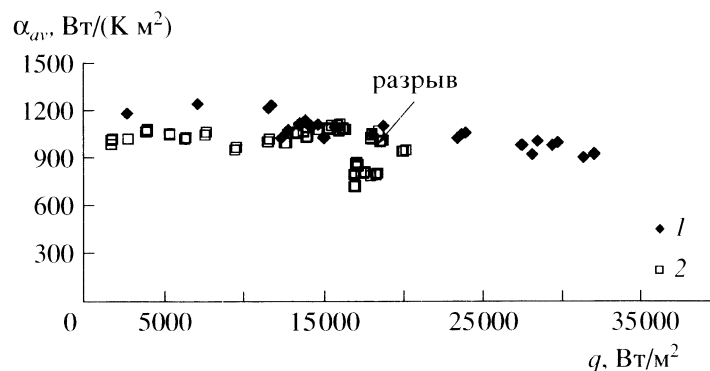


Рис. 8. Влияние длины пробег пленки на зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока, вода. Re = 10.5; 1 – $X_n = 396$ мм, 2 – $X_n = 63$ мм.

испарение жидкости) практически не изменяется до разрыва пленки. В результате формирования струйного течения в режиме 2 при $X_n = 63$ мм средний коэффициент теплоотдачи снижался на 5–30%.

При $X_n = 396$ мм коэффициент теплоотдачи, как правило, превосходил его значение при $X_n =$

$= 63$ мм на 5–20% в области до разрыва при одинаковых Re (рис. 8). После разрыва пленки отличие коэффициентов теплоотдачи для разных X_n возросло до 40%. Увеличение длины пробег пленки жидкости приводило к существенной интенсификации среднего теплообмена при появлении

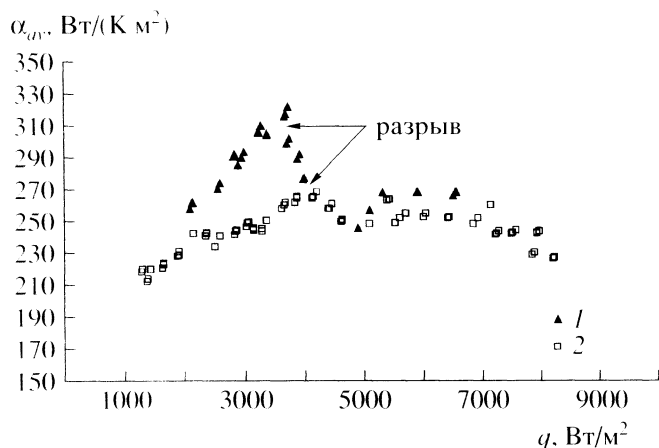


Рис. 9. Влияние начальной температуры жидкости на зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, FC-72. 1 – $Re = 5.1$, $T_0 = 30^\circ\text{C}$; 2 – $Re = 4.9$, $T_0 = 26^\circ\text{C}$.

сухих пятен за счет волнового движения пленки жидкости. Для воды, имеющей относительно высокий угол смачивания, при малых длинах пробега пленки $X_n = 63$ мм разрыв вызывал образование сухих пятен большой площади на значительной части нагревателя (рис. 5б). При $X_n = 396$ мм и тех же числах Рейнольдса по нагревателю двигались крупные солитообразные волны, которые под действием термокапиллярных сил разбивались на неустойчивые, меняющие свое положение струи (рис. 5в). Хотя первые сухие пятна возникали при одинаковых Re и примерно тех же значениях q , в случае $X_n = 396$ мм они смывались потоком. Устойчивые стационарные пятна наблюдались при более высоких значениях q . Происходило изменение закономерностей теплообмена (см. рис. 4). Коэффициент теплоотдачи уменьшался в гораздо меньшей степени, чем при $X_n = 63$ мм (рис. 8).

Влияние начальной температуры жидкости на средний коэффициент теплоотдачи для варианта течения пленок FC-72 при формировании структур в режиме А показано на рис. 9. Видно, что начальная температура пленки, характеризующая влияние испарения, оказывала существенное влияние на теплообмен. При $2000 < q < 3700$ Вт/м² на поверхности пленки происходило формирование струй в режиме А. Пленка оставалась сплошной. Увеличение деформации поверхности пленки жидкости в условиях более интенсивного испарения ($T_0 = 30^\circ\text{C}$) приводило к росту коэффициента теплоотдачи. Смываемые сухие пятна появлялись при $q = 3700$ Вт/м², относительно устойчивое движение струй наступало при $q = 4900$ Вт/м². В этой области средний коэффициент теплоотдачи уменьшался. При меньшей начальной температуре жидкости и, соответственно, интенсивности испарения

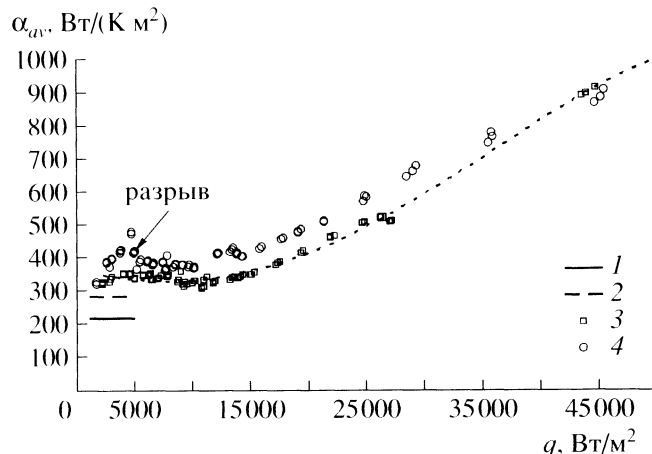


Рис. 10. Влияние начальной температуры жидкости на зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, FC-72, $Re = 17$. 1 – расчет по формулам (2), (3); 2 – расчет по формулам (3), (4); $q_s/q = 0.4$; 3 – $T_0 = 18^\circ\text{C}$, 4 – $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

качественно картина не изменялась, но интенсивность роста теплоотдачи уменьшалась.

На рис. 10 приведены данные по коэффициентам теплоотдачи для двух различных начальных температур жидкости FC-72. Число Рейнольдса равнялось 17. На нагревателе наблюдалось либо совместное существование структур А и Б, либо струи формировались только в режиме Б. Движение струй было более динамичным, и относительно устойчивые структуры не наблюдались. Рост интенсивности испарения компенсировал ухудшение теплоотдачи при появлении смываемых сухих пятен.

Средняя плотность теплового потока с поверхности пленки воды, расходуемого на испарение, определялась экспериментально. Зависимость средних значений q_s/q до появления сухих пятен от Re в исследуемом диапазоне описывается следующим соотношением:

$$q_s/q = 0.77Re^{-0.65}. \quad (1)$$

На рис. 11 показано сравнение полученных из эксперимента осредненных значений $\langle Nu \rangle = \alpha_{av} h_0 / \lambda$ для пленок воды с теоретическими данными для чисел Нуссельта [19]. Здесь h_0 – начальная толщина пленки, λ – коэффициент теплопроводности жидкости. Связь среднего коэффициента теплоотдачи со значением α_F , рассчитанным по среднemasсовой температуре, определялась по следующей формуле:

$$\alpha_{av} = \frac{\alpha_F}{1 + \frac{\alpha_F L}{\mu C_p Re_F}}, \quad (2)$$

где C_p – теплоемкость жидкости, Re_F – число Рейнольдса, рассчитанное по среднemasсовой температуре. Средний коэффициент теплоотдачи, вычисленный по среднemasсовой температуре пленки

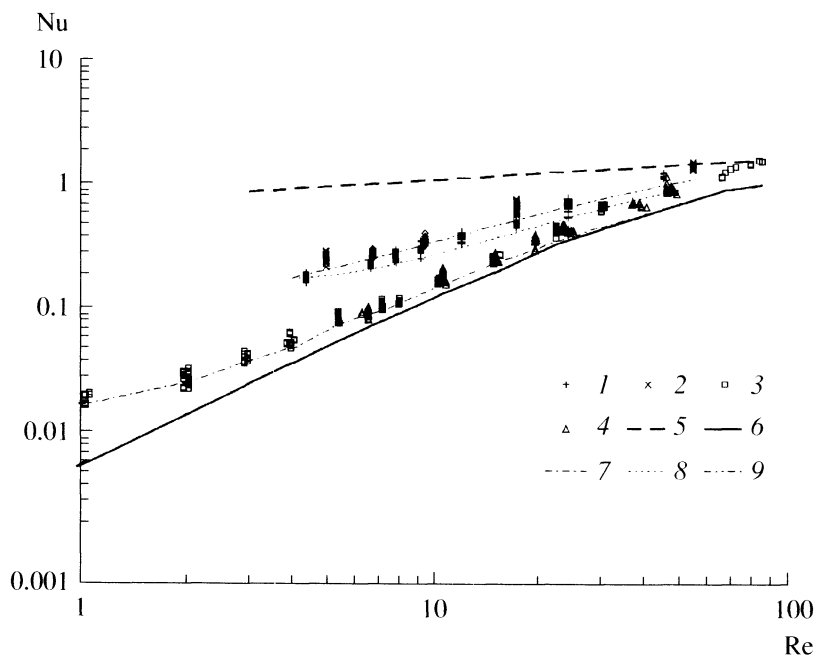


Рис. 11. Зависимость Nu от Re . Экспериментальные данные: 1 – FC-72, $T_0 = 18^\circ\text{C}$; 2 – FC-72, $T_0 = 30^\circ\text{C}$; 3 – вода, $X_n = 63$ мм; 4 – вода, $X_n = 396$ мм. Расчеты: 5 – [9]; 6 – по зависимостям (2) и (3); 7 – по зависимостям (1), (3) и (4) для воды; 8 – по зависимостям (3) и (4) для FC-72 при $T_0 = 18^\circ\text{C}$; 9 – по зависимостям (3) и (4) для FC-72 при $T_0 = 30^\circ\text{C}$.

жидкости, определялся по формуле, полученной в [1] на основании аппроксимации расчетов [19]:

$$\alpha_F = 0.0236 \frac{\mu C_p}{L} 4Re_F + 2.07\lambda \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3} (4Re_F)^{-1/3}. \quad (3)$$

Здесь g – ускорение силы тяжести, v – коэффициент кинематической вязкости жидкости. Все экспериментальные данные лежат существенно выше линии, рассчитанной по (2), (3). При $Re > 7$ разница составляет 25–50%. При $Re < 7$ расхождение с теорией увеличивается до 300%, что, по-видимому, соответствует росту влияния испарения при уменьшении числа Рейнольдса. Сравнение выполнено до формирования сухих пятен в пленке жидкости.

Учет испарения может быть выполнен с использованием зависимости для среднemasсовой температуры пленки и соотношения (1). В этом случае формула для расчета среднего коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$\alpha_{av} = \frac{\alpha_F}{1 + \frac{\alpha_F L}{\mu C_p Re_F} \left(1 - \frac{q_s}{q}\right)}. \quad (4)$$

На рис. 11 приведены результаты расчетов числа Нуссельта по зависимостям (3), (4) с использованием (1). Наибольший разброс экспериментальных данных (до 40% между минимальным и максимальным значением) наблюдался при $Re = 1$ и 2 для пленок воды. При $Re = 3$ –15 отличие уменьшается до 15%. Учет влияния q_s/q улучшает результаты обобщения эксперимента при $3 < Re < 15$. В этом диапазоне влияние плотности теплового

потока на поведение чисел Nu до разрыва пленки не существенно. При $Re > 20$ экспериментальные данные лежат систематически выше расчетных на 30–40%, что связано с волновыми эффектами. При увеличении X_n и, соответственно, амплитуды волн отличие от расчетов по зависимостям (3), (4) возросло до 60%.

Обработка опытных данных для более интенсивно испаряющихся пленок жидкости FC-72 представлена на рис. 11. В этой серии экспериментов также исследовалось влияние начальной температуры жидкости на теплообмен. Опытные данные лежат существенно выше рассчитанной по (2), (3) линии. При $Re > 15$ разность составляет 25–70%. При $Re < 15$ расхождение с теорией увеличивается до 300%. Учет влияния q_s/q описывает экспериментальные данные при $Re < 20$. На рис. 11 дополнительно приведена зависимость из [9], описывающая теплообмен к испаряющейся пленке жидкости при температуре насыщения. Видно, что при малых Re теплоотдача к недогретой пленке жидкости существенно меньше, а при высоких Re , особенно при максимальной температуре жидкости (недогрев 26°C), разность становится незначительной.

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ НА ТЕПЛОБМЕН В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

Термокапиллярные силы оказывают сложное влияние на теплообмен. На рис. 12 показана зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи при формировании структур А от безразмерной

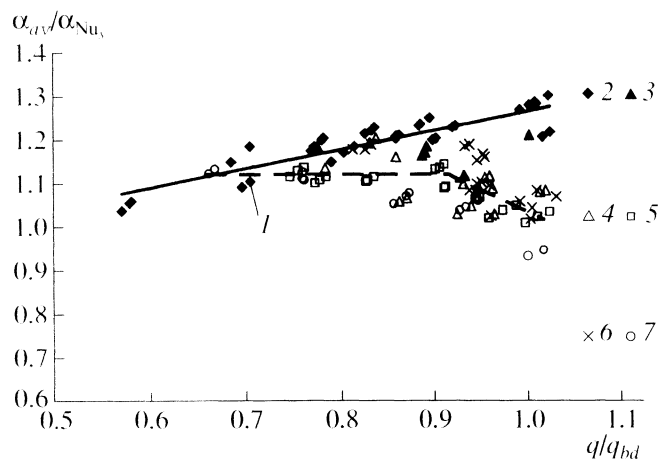


Рис. 12. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи при формировании структур А от безразмерной плотности теплового потока. 1 – появление структур А. 2 – Re = 5, FC-72; 3–7 – вода. 3 – Re = 1, 4 – 3, 5 – 4, 6 – 5.4, 7 – 8.1.

плотности теплового потока (q_{bd} – плотность теплового потока, соответствующая разрыву пленки). Коэффициент теплоотдачи $-\alpha_{Nu_s}$ рассчитывался по формулам (3) и (4). Экспериментальные данные при малой интенсивности испарения $q_s/q < 0.4$ (вода, Re = 3–8) превышают теоретическое значение Нуссельта на 10% и не зависят от безразмерной плотности теплового потока до $q/q_{bd} < 0.9$. Необходимо отметить, что данное различие находится в пределах погрешности эксперимента. Имеется существенный разброс экспериментальных данных, что объясняется многократным повторением измерений и особенностями развития струйного течения. При $0.9 < q/q_{bd} < 1$ безразмерный коэффициент теплоотдачи несколько уменьшается. При интенсивном испарении $q_s/q > 0.55$ рост коэффициента теплоотдачи происходит равномерно при развитии трехмерных возмущений в диапазоне $0.65 < q/q_{bd} < 1$.

При движении волновой пленки жидкости и формировании структур в режиме Б измерение характеристик среднего теплообмена показало, что при увеличении плотности теплового потока до величин, предшествующих разрыву пленки жидкости, средний коэффициент теплоотдачи не увеличивается (рис. 13). Интенсификация теплообмена по сравнению с гладкой пленкой жидкости, определяемой по формулам (3) и (4), обусловливается волновым движением на поверхности пленки.

Анализируя влияние развития структур Б на теплообмен при малом ($q_s/q < 0.15$) и умеренном испарении ($q_s/q < 0.5$), можно заключить, что вплоть до появления первых смываемых сухих пятен средний коэффициент теплоотдачи не зависит от плотности теплового потока. Хотя в нижней части нагревателя зарегистрировано уменьшение толщи-

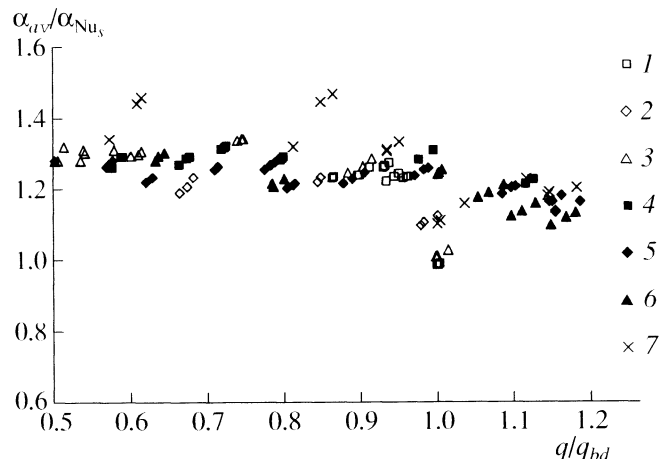


Рис. 13. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи при формировании структур Б от безразмерной плотности теплового потока. 1–3 – вода, $X_n = 63$ мм, 1 – Re = 10.5, 2 – Re = 15.4, 3 – Re = 22.2; 4–6 – FC-72, $X_n = 63$ мм, 4 – Re = 9.2, $T_0 = 19^\circ\text{C}$, 5 – Re = 17, $T_0 = 18^\circ\text{C}$, 6 – Re = 25, $T_0 = 17^\circ\text{C}$; 7 – вода, $X_n = 396$ мм, Re = 11.

ны пленки жидкости в 2 раза [20, 21] и обнаружена локальная интенсификация теплообмена [14], на большей части нагревателя утоньшение пленки невелико. Термокапиллярные силы не приводят к росту относительной амплитуды волн на поверхности пленки. В результате влияние термокапиллярных эффектов на теплообмен при формировании струй в режиме Б в условиях малого и умеренного испарения незначительно. В режиме теплообмена 2 при слабом волновом движении и испарении в результате разрыва пленки происходит значительное ухудшение теплоотдачи. Однако при совместном воздействии термокапиллярных сил с волновыми эффектами (разрушение солитонов) и испарения резкого ухудшения теплоотдачи не происходит. Отметим, что совместное воздействие волнового движения и испарения на теплообмен не является аддитивным. Изменение величины X_n не приводило к заметному изменению теплообмена в случае умеренной интенсивности испарения ($q_s/q < 0.5$).

При малых числах Рейнольдса (Re < 7) как для легкокипящей жидкости FC-72, так и для недогретых пленок воды при существенном влиянии испарения обнаружена интенсификация теплообмена для случая формирования структур в режиме А. Образование струй приводит к утоньшению пленки жидкости между ними. В режиме А струи формируются с верхнего края нагревателя, вызывая значительную деформацию поверхности пленки над всей поверхностью нагревателя. В режиме Б формирование струй происходит в нижней части нагревателя, в то время как деформация поверхности пленки над верхней частью нагревателя невелика. В результате при формировании струй в режиме А теплообмен более чувствителен к испарению жидкости, чем в режиме Б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено комплексное исследование среднего теплообмена при течении пленок, недогретых до температуры насыщения жидкостей. Изучено совместное влияние термокапиллярных эффектов, волнообразования и испарения. Построены карты режимов теплообмена при течении пленок слабо и интенсивно испаряющихся жидкостей. Определены и исследованы области теплообмена, в которых теплоотдача от нагревателя осуществляется в струям, стекающим по осушенной поверхности.

Показано, что термокапиллярные силы оказывают неоднозначное влияние на теплообмен. Формирование струй, разрыв пленки и появление устойчивых сухих пятен вызывают, как правило, снижение среднего конвективного коэффициента теплоотдачи при отсутствии интенсивного испарения. С другой стороны, увеличение длины пробега пленки и амплитуды волнового движения приводит к смыванию сухих пятен, а следовательно, интенсификации теплообмена. Установлено, что термокапиллярно-волновое движение пленки жидкости увеличивает теплоотдачу на 25–70% при $Re = 10–50$. В условиях значительной интенсивности испарения обнаружена интенсификация теплообмена при формировании структур в режиме А.

При течении пленки по нагревателям с малыми линейными размерами разрыв пленки имеет особенности для малых и для больших чисел Рейнольдса. Измерения показывают, что закономерности теплообмена в области течения пленки с разрывами существенно различаются для слабо и интенсивно испаряющейся жидкости. При формировании обширных сухих пятен средний коэффициент теплоотдачи к пленке всегда уменьшается. Однако в некоторых режимах течения струй с разрывами пленки между ними интенсивность теплоотдачи возрастает, что, по-видимому, связано с неустойчивым их движением, вторичным орошением осушенной поверхности и интенсивным испарением в микрослое на краях ривулетов. Данные режимы течения и механизм теплообмена требуют дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-08-33325-а), ФЦНТП (гос. контракт № 02.438.11.7002) и гранта ведущих научных школ № НШ-6749.2006.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wilke W. Wärmeübergang an Rieselfilme // VDI-Forschungsheft N. 1962. № 490. P. 1.
2. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен к жидким пленкам. Киев: Техника, 1972. 194 с.
3. Гогонин И.И., Дорохов А.Р., Бочагов В.Н. К вопросу образования "сухих пятен" в стекающих тонких пленках жидкости // Изв. СО АН СССР. 1977. Т. 3. № 13. С. 46.
4. Fujita T., Ueda T. Heat Transfer to Falling Liquid Films and Film Breakdown-I (Subcooled Liquid Films) // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1978. V. 21. P. 97.
5. Нугматулин Б.И., Горюнова М.З., Васильев Ю.В. К обобщению опытных данных по теплоотдаче при течении жидких пленок вдоль твердых поверхностей // ТВТ. 1981. Т. 19. № 5. С. 991.
6. Ганчев Б.Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987. 192 с.
7. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моксклас, 1988. 232 с.
8. Kandlikar S.G. Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation. Philadelphia: Taylor and Francis, 1999.
9. Alhusseini A., Tuzla K., Chen J.C. Falling Film Evaporation of Single Component Liquids // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1998. V. 41. P. 1623.
10. Chinnov E.A., Kabov O.A., Muzykantov A.V., Zaitsev D.V. Influence of Plate Inclination on Heat Transfer and Breakdown of Locally Heated Flowing Liquid Film // Intern. J. Heat and Technology. 2001. V. 19. № 1. P. 31.
11. Кабов О.А., Чиннов Е.А. Теплообмен от локального источника тепла к недогретой пленке жидкости // ТВТ. 2001. Т. 39. № 5. С. 758.
12. Pavlenko A.N., Lel V.V. Heat Transfer and Crisis Phenomena in Falling Films of Cryogenic Liquid // Rus. J. Eng. Thermophys. 1997. V. 7. № 3–4. P. 177.
13. Chinnov E.A., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. Heat Transfer and Breakdown of Subcooled Falling Liquid Film on a Vertical Middle Size Heater // Intern. J. Heat and Technology. 2002. V. 20. № 1. P. 69.
14. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Влияние трехмерных деформаций на локальный теплообмен к неоднородно нагреваемой стекающей пленке жидкости // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 269.
15. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128.
16. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Исследование неустойчивости неизотермической пленки жидкости и формирования струй // XXVII Сибирский теплофиз. семинар. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2004. С. 393.
17. Kabov O.A., Chinnov E.A., Legros J.-C. Three-Dimensional Deformations in Non-Uniformly Heated Falling Liquid Film at Small and Moderate Reynolds Numbers // 2nd Intern. Berlin Workshop Transport Phenomena with Moving Boundaries. VDI Reihe 3, Nr. 817. Düsseldorf: VDI Verlag, 2004. P. 62.
18. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Исследование теплообмена в недогретой до температуры насыщения испаряющейся пленке жидкости // XXVIII Сибирский теплофиз. семинар. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2004. С. 395.
19. Nusselt W. Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler // Zeitschrift der VDI. 1923. Bl. 67. H. 9. P. 206.
20. Зайцев Д.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А., Марчук И.В. Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 6. С. 31.
21. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Кабов О.А., Серов А.Ф. Измерение волновых характеристик неизотермической пленки жидкости емкостным методом // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 3. С. 441.